

ホログラフィックデータストレージの技術動向

新製品開発研究所 服部 覚 佐藤 伸

1 緒 言

インターネット等の普及により大容量かつ高速転送レートを満たす次世代のストレージシステムが要求されている。光記録技術ではBlu-ray、HD-DVDの次世代に位置付けられる200G~1TB/diskの開発が進められている。主な技術として、ホログラフィックデータストレージ(HDS)、近接場光記録、多層記録が候補とされているが、次によりHDSが有利と考えられている。第一に転送レートである。HDSは記録・再生をページデータで扱うためページあたりのデータを大きく(メガビット:Mbitオーダー)することで転送レートを飛躍的に向上させることができる。これに対し近接場や多層記録はビット・バイ・ビット(bit by bit)方式であるため不利である。第二に大容量化である。HDSでは多重化が可能であるため高密度化が容易である。これに対し、ビット・バイ・ビット方式では多重化ができないため、スポットサイズを小さくすることにより高密度化することになるが、高開口数(NA)のレンズ、記録光源の短波長化というようにハード面での制約がある。

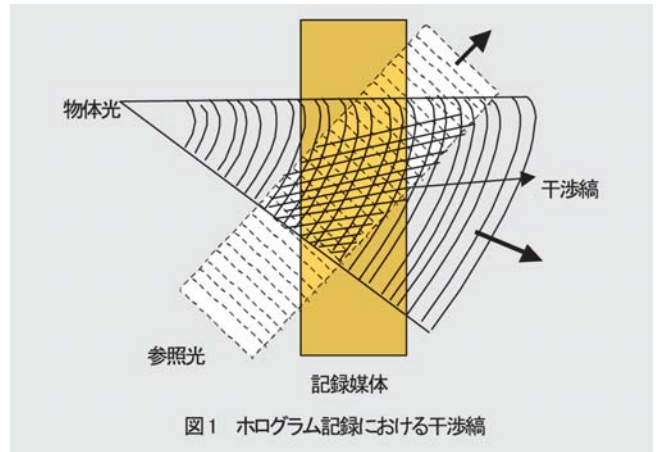
このように、HDSは魅力的な技術であり1970年代から研究されているものなかなか実用化には至らなかった。しかし、1990年代に、2次元ページデータの画像処理に必要なSLM(Spatial Light Modulator)、DMD(Digital Micromirror Device)等の空間変調器、CCD(Charge-Coupled Device)、CMOS(Complementary MOS)等の撮像素子がプロジェクターやビデオカメラの普及で高性能化されたというシステム面でのブレークスルーがあったことに加えて、米国におけるHDSS(Holographic Data Storage System)、PRISM(Photorefractive Information Storage Materials)といったコンソーシアムや日本国内のベンチャーによる新規な光学系を用いたシステムの発表等により、これまでになく実用化に近いシステムが立上ってきているという段階である。

本稿では、ホログラフィックストレージの技術動向としてフォトポリマー材料を用いた記録媒体を中心に述べる。

2 ホログラフィックデータストレージ

2.1 ホログラムの原理

ホログラムは1940年代に発明された技術¹⁾で、その後1960年代にレーザーの発明とともに急速に研究されるようになった。特に3D立体像の再生技術は写真やクレジットカードといった分野に広く応用されている。ホログラムの原理は物体光と参照光の2つの光を記録媒体上で干渉させ、その干渉縞を記録媒体に物理的変化として記録するものであるが(図1)、その物理的変化として、表面に凹凸を形成するエンボス型(レリーフ型)と内部に屈折率差を形成する体積型に分けられる。HDSでは後者の体積型が用いられる。また、HDSには1回書き込み可能なWORM(Write Once Read Many:追記)型と書き換え可能なRW(Re-Writable:書換)型があるが、今のところWORM型の開発が先行している状況である。とりわけフォトポリマー材料を用いた記録媒体は、後述する米国のベンチャーのAprilis社、InPhase社よりすでに発表されており完成度が高い。



フォトポリマー材料の記録メカニズムは以下のように考えられている。干渉縞の明暗において、光強度の強い部分で重合が開始しモノマーが消費され、逆に光強度の弱い部分のモノマーは光強度の強い領域に拡散移動する²⁾。その結果、光の強弱によりモノマーの密度差ができ、それが干渉縞に応じた屈折率差となって回折光をつくる(図2)。したがって回折光強度はこの屈折率差が大きいほど強くなる。高感度な記録媒体としては、“いかに低露光量で回折光(屈折率差)を得るか”が重要である。

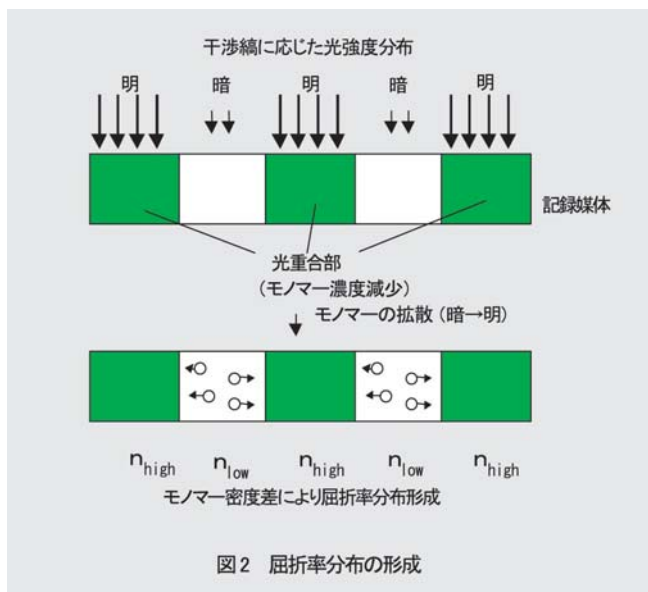
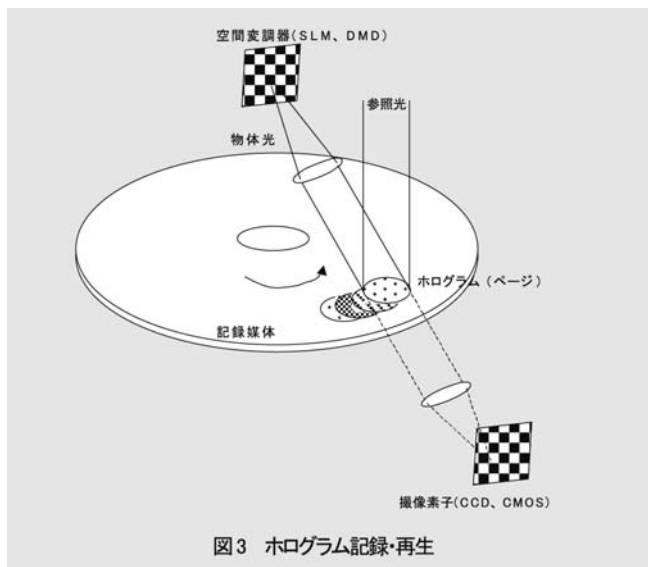


図3にHDSの基本的な記録・再生光学系を示す。物体光にはページデータを空間変調器で変調された光を用い、記録媒体上で参照光と干渉させ記録する。これをディスクが回転しながら行うことで多重化する。再生時は参照光のみ照射し、回折光を読み取る。基本的にはこのように二光束の光学系となるため、光軸のアライメントが複雑となる、という問題がある。そこで国内のベンチャーであるオプトウエア社は物体光と参照光を同軸に配置したコリニア方式を提案している³⁾。コリニア方式ではアライメントにかかる装置の複雑さを解消するというだけでなく、再生時のチルト、デフォーカス、デトラックマージン(許容幅)が大きく、有利であるとしている。



2.2 フォトポリマー材料

フォトポリマー材料として代表的なカチオン、ラジカル重合系の例を示す。

2.2.1 カチオン重合系

カチオン重合系を用いた例としては、Aprilis社のCROP(Cationic Ring-Opening Polymerization)が挙げられる⁴⁾。ラジカル重合系

の多くで用いられているビニルモノマーの重合では重合時の結合距離の変化が大きく、その結果、硬化収縮といわれる大幅な体積減少を生じる。これに対しAprilis社ではカチオン開環重合するモノマーを使用することにより低減したことが大きな特徴である。ここではホログラム形成時の硬化収縮率をBraggのずれから求めた結果において0.1%以下と報告している。

2.2.2 ラジカル重合系

ラジカル重合系を用いた例としては、DuPont社のOmniDex⁵⁾、InPhase社のTapestry⁶⁾等が挙げられるが、データストレージ用としては後者が市販されている。Tapestryは高屈折率の光重合性モノマーと低屈折率のマトリクスから構成される⁶⁾。硬化収縮率は0.1%と低く、 $M/\#$ (ダイナミックレンジ:多重性能を示す指数)は1.5mm厚の媒体において50といった値が報告されている⁷⁾。

2.3 評価結果

最後に我々が検討中の多重記録特性⁸⁾について少し触れる。我々は2003年度NEDOの助成を受けてホログラフィックストレージ記録媒体の検討をオプトウエア社、日本ペイント社と行った。

フォトポリマー材料にはラジカル重合性モノマーを用い、多重記録特性はパルステック社製コリニアホログラフィックメディアテスター(SHOT-1000)を用いた。スポットサイズは200 μ mで、スポットあたりのデータサイズは1.6kBである。多重方法は、可変ピッチのシフト多重方式(VPS:Variable Pitch Spiral method)にて行った。VPSは図4に示すように、 $(2M^{1/2} - 1) \times (2M^{1/2} - 1)$ 個のホログラムを、spiral状に(スポット径/ $M^{1/2}$)のピッチでシフトさせながら記録したときの最後のホログラムが、多重数(M:Multiplicity)となるようにする方法であり、最小の記録ホログラム数で多重を評価することができる。表1は多重数、ピッチ、ホログラム数、ディスク換算の容量をまとめたものである。

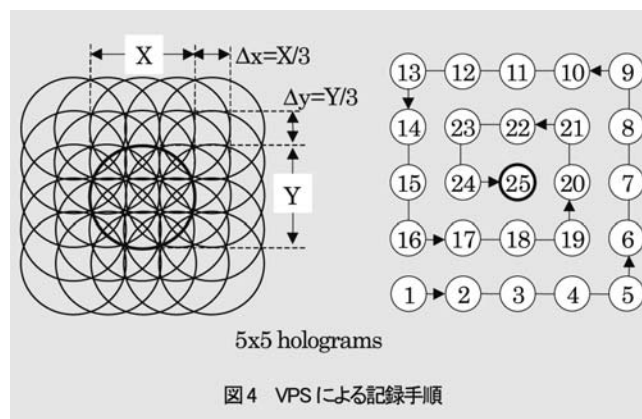


表1 VPS 記録における多重数とディスク上での記録容量の関係

Multiplicity	$\Delta x, \Delta y$	Number of Holograms	Record Density (GB/Disc) ¹⁾
1	X/1, Y/1	1x1	0.5
4	X/2, Y/2	3x3	1.8
9	X/3, Y/3	5x5	4.1
:	:	:	:
49	X/7, Y/7	13x13	22.5
:	:	:	:
M	X/ M ^{1/2} , Y/ M ^{1/2}	(2M ^{1/2} -1)(2M ^{1/2} -1)	(iM/s)S

1) Spot size $s=200\mu\text{m}\phi$, Data size $i=1.6\text{kB/spot}$, Disc Area $S=8.8\times 10^{-3}\text{m}^2$ (Disc size 120mm ϕ).

図5に13×13=169個のデジタルデータの多重特性例を示す。a)は各ホログラムの回折効率(Diffraction Efficiency)及びLaser Pulse数(露光量のスケジューリングパルス数)、b)はSNR(Signal-to-Noise Ratio)、c)はBER(Bit Error Rate)をそれぞれ示している。SNRは3~4、BERは10⁻³以下と良好であり、49多重に相当する169番目のホログラムでもともに悪化することなく記録ができることを確認した。この49多重は12cmディスクに換算すると23GBに相当する。

今後はさらに多重数を上げた場合についての検討を進める予定である。

次世代データストレージ技術としてホログラフィックデータストレージについての技術動向をまとめた。フォトポリマー材料を用いた記録媒体のポテンシャルは高く、実用化に近いところまで来ていると思われる。今後はさらなる記録特性の向上は言うまでもないが、多重化を重視した開発とそれに伴う問題点をクリアにしていけることが重要であると感じている。

引用文献

- 1) D. Gabor, *Nature*, 161, 777 (1948)
- 2) W. S. Colburn, K. A. Haines, *Appl. Opt.*, 10, 1636 (1971)
- 3) 堀米秀嘉, *光学*, 32, 9, 542 (2003)
- 4) D. A. Waldman, et. al., *Proc. SPIE*, 2689, 15, 127 (1996)
- 5) B. M. Monroe, *J. Imaging Sci.*, 35, 25 (1991)
- 6) L. Dhar, et. al., *Optics Letters*, 24, 7, 487 (1999)
- 7) <http://www.inphase-technologies.com>
- 8) S. Satoh, S. Hattori and H. Sasaki, *ISOM 2004*, Th-J-06.

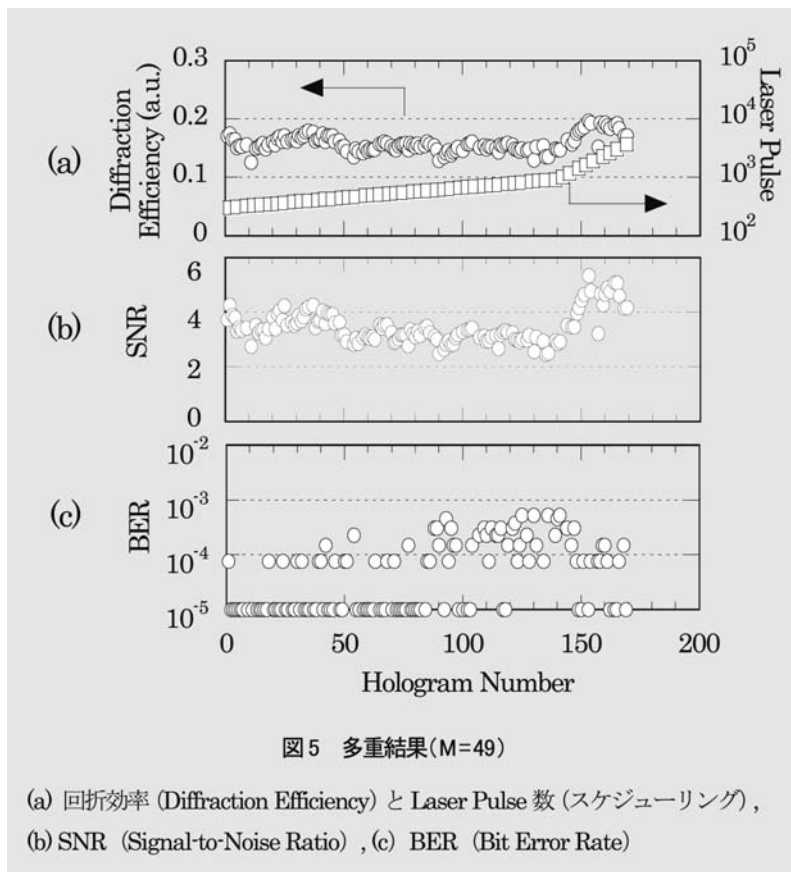


図5 多重結果(M=49)

(a) 回折効率 (Diffraction Efficiency) と Laser Pulse 数 (スケジューリング), (b) SNR (Signal-to-Noise Ratio), (c) BER (Bit Error Rate)